

Оптимизация газовых смесей многополосных эксиламп

© А.М. Бойченко,¹ М.С. Кленовский,² Э.А. Соснин,^{3,4} В.Ф. Тарасенко^{3,4}

¹ Институт фундаментальных проблем теоретической физики и математики,
123022 Москва, Россия

² Высшая школа химической технологии,
16628 Прага, Чехия

³ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

e-mail: boichenko.iftpm@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 ноября 2022 г.

В окончательной редакции 31 января 2023 г.

Принято к публикации 9 февраля 2023 г.

Рассмотрена проблема оптимизации газоразрядных источников многополосного ультрафиолетового излучения — эксиламп. Предложена методика по оценке соотношения парциальных давлений компонент газовой смеси, позволяющая упростить процесс разработки многополосной эксилампы с желаемым соотношением мощностей излучения полос. Показано, что оптимизация многополосной эксилампы на смеси одного инертного газа с несколькими галогенонесителями может быть сведена к задаче оптимизации эксилампы на двухкомпонентной смеси. В случае необходимости использования, наряду с излучением эксиплексных, излучения также и эксимерных молекул, данная методика позволяет регулировать относительный вклад мощностей этих молекул.

Ключевые слова: газовый разряд, источники ультрафиолетового излучения, кинетика плазмохимических процессов, эксимерные и эксиплексные молекулы.

DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55042.247-22

Введение

Существует большое разнообразие источников излучения [1], работающих в различных диапазонах длин волн и характеризующихся различными принципами действия и выходными параметрами [1–21]. Среди них в самых разнообразных областях науки, производства и потребления широко востребованы источники ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения [1,6,9,10,12,14–18,21–40]. Особым спросом начинают пользоваться эксилампы [1,6,9,10,12,14–18,22–25,27–32,34–36,41–43]. Например, эксилампы на молекулах $KrCl^*$ обеспечивают лучшую, по сравнению с конвенциональными ртутными лампами низкого давления, инактивацию возбудителей вирусных источников [44,45].

Эксилампы — источники относительно узкополосного УФ- и ВУФ-излучения. Ширина полосы излучения различных сортов эксиплексных молекул на полувысоте составляет от 2 до 15 nm, а у эксимерных может достигать до 30 nm. Однако на практике иногда возникает необходимость в широкополосном или многоволновом источнике излучения, имеющем особый спектральный состав. В качестве таких источников могут также применяться эксилампы, так как им свойственна возможность одновременного возбуждения нескольких сортов эксиплексных молекул [46–50]. Выбирая эксиплексные молекулы, излучающие в желаемом спектральном

участке [51], можно получить источник излучения со спектральной характеристикой, представляющей собой комбинацию спектральных характеристик соответствующих эксиплексных молекул. Наиболее сложной задачей, которую приходится решать в ходе разработки многополосного источника УФ-излучения с желаемым спектральным составом, является обеспечение необходимого соотношения мощностей излучения каждой полосы. При разработке многополосной эксилампы на основе многокомпонентной смеси разработчики сталкиваются с необходимостью нахождения оптимальных условий работы эксилампы. Это, по существу, задача оптимизации функции многих переменных. На практике ее решение оказывается весьма затратным и трудоемким процессом.

Существует достаточно много разнообразных эффективных методов оптимизации функции многих переменных (см., например, [52–54]), среди них — метод наискорейшего спуска [55], метод сопряженных направлений [56] и др., позволяющих довольно быстро находить экстремум целевой функции. Но на практике с применением подобных методик возникают сложности, поскольку существующие методы не учитывают специфику работы экспериментальной установки и поэтому могут требовать изменения условий в очень неудобной с практической точки зрения последовательности, что, в свою очередь, может приводить к таким нежелательным эффектам, как, например, излишний расход рабочих газов. Существует и ряд других сложностей,

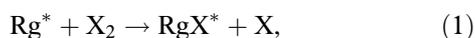
существенно ограничивающих применение имеющихся математических методов оптимизации функции многих переменных на практике. Так, для каждого отдельного случая может требоваться разработка своей методики оптимизации, учитывающей специфику работы экспериментальной установки.

На практике большой популярностью при оптимизации многокомпонентных смесей пользуется не очень эффективный с математической точки зрения метод циклического покоординатного спуска. Суть метода состоит в последовательной одномерной оптимизации по каждой из переменных, в то время как все остальные остаются фиксированными [52–54]. Оптимизация проводится в несколько циклов до тех пор, пока изменение каждой из переменных не будет приводить к снижению оптимизируемой величины. Нужно отметить, что, хотя этот метод и весьма прост, он требует большого расхода рабочих газов и времени. Более того, согласно теории, метод циклического покоординатного спуска не всегда может гарантировать нахождение глобального экстремума функции многих переменных [52–54].

Важно отметить, что большей сложностью в данной задаче характеризуется оптимизация рабочей смеси, т. е. определение оптимальных парциальных давлений компонент газовой смеси. Поэтому в связи с существующей проблемой, разработка методик, позволяющих ускорить процесс оптимизации многополосных эксилламп на основе многокомпонентной смеси, имеет большую практическую ценность. Насколько нам известно, работы по разработке методик оптимизации активных сред газоразрядных источников излучения, в частности, многополосных эксилламп, ранее не проводились.

1. Излучение эксиплексных молекул

Хорошо известно, что образование эксиплексных молекул осуществляется в основном посредством двух механизмов [57–67]: гарпунная реакция



и реакция ион-ионной рекомбинации



где Rg — атом инертного газа, X — атом галогена, RgX* — эксиплексная молекула, M — третья частица, уносящая избыток энергии (как правило, атомы рабочего инертного газа).

Следует отметить, что существуют и другие механизмы образования эксиплексных молекул, как например [9,68–80], но они менее распространены и поэтому в настоящей работе не рассматриваются.

Как правило, в большинстве случаев преобладающей в формировании эксиплексных молекул в основном является только одна из вышеприведенных реакций [1,17,18,81]. Эффективность образования эксиплексных молекул за счет трехчастичной реакции ион-ионной

рекомбинации (2) пропорциональна вероятности тройного соударения (сближения на расстояние в пределах области взаимодействия) соответствующих реагентов [62,82–86], а значит и их концентраций, что соответственно реализуется при значительных давлениях рабочей смеси. При относительно низких давлениях рабочей смеси преобладающий вклад в образование эксиплексных молекул вносит бинарная гарпунная реакция (1) [1,17,18,87–93].

Обзор литературы указывает на отсутствие единого мнения относительно граничных значений давления рабочей смеси, соответствующих переходу от преобладания одного механизма образования эксиплексных молекул к преобладанию другого. Превалирование того или иного канала зависит не только от общего давления рабочей смеси, но и от условий накачки и сорта галогеноносителя. В частности, в работах [1,17,18,81] отмечается, что в случае использования в качестве галогеноносителя молекул Cl₂ образование эксиплексных молекул в диапазоне давлений смеси вплоть до атмосферы осуществляется главным образом за счет гарпунной реакции. К аналогичному заключению пришли и авторы работы [94], установив, что в диапазоне оптимальных давлений смеси ксенона и молекулярного хлора (~ 200–250 Торр) гарпунная реакция является основным каналом образования эксиплексных молекул XeCl*.

В настоящей работе положим, что при оптимальных давлениях рабочей смеси вкладом реакции (2) в образовании эксиплексных молекул можно пренебречь. Такая ситуация в большей мере соответствует эксиллампам с относительно низким общим давлением смеси, как, например, эксиллампам с возбуждением тлеющим и емкостным разрядами, хотя работы [1,17,18,81,94] указывают на пренебрежимый вклад реакции ион-ионной рекомбинации и в барьерном разряде с давлением рабочей смеси в сотни Торр для смесей, содержащих Cl₂. Тогда, анализируя гарпунную реакцию (1), можно прийти к выводу, что случай смеси одного инертного газа с несколькими галогеноносителями имеет особенность, позволяющую упростить рассмотрение кинетики образования эксиплексных молекул.

Теоретическое описание лазерных и ламповых источников представляет собой сложную задачу. В таком описании одновременно решается большое число задач, непосредственно связанных с проходящими в этих системах процессами, начиная от источников питания, процессами ввода энергии в среду, кинетического описания проходящих в плазме процессов, учета неоднородности концентрации компонентов среды и заканчивая процессами формирования и выноса излучения из этих источников. Такое полное описание очень затратно и оправдано на этапе проектирования каких-либо больших установок исключительной важности. Отметим, например, что общее число учитываемых плазмохимических процессов в современных моделях достигает нескольких сотен. Но

часто в таком подробном описании нет необходимости. При использовании разумных предположений, как правило, удастся без существенных потерь описывать выходные характеристики источников излучения, существенно снижая при этом сложность моделирования. Одним из таких предположений является использование однородного распределения концентраций реагентов в активной среде. Как оказалось, такие модели способны адекватно описывать не только выходные характеристики излучения, но и оптимальные значения различных параметров — от концентраций различных реагентов до параметров резонаторов как в ламповых [1,17,18], так и в лазерных источниках излучения с различными типами неравновесности как в плазменных [58–67], так и в газовых [95,96] лазерах. В силу этого, распределения параметров плазмы при дальнейшем рассмотрении будем считать однородными. Кроме того, из огромного числа реакций мы будем рассматривать только некоторые, имеющие ключевое значение для рассматриваемых в настоящей работе вопросов.

Поскольку парциальные давления галогеноносителей можно считать постоянными, а значит их концентрации известными, единственным неизвестным (реагентом) в гарпунной реакции образования эксиплексных молекул остается концентрация возбужденных атомов инертного газа, которая зависит от условий возбуждения эксилампы. Но, поскольку возбужденные атомы инертного газа в случае смеси одного инертного газа с несколькими галогеноносителями являются общим реагентом как для образования эксиплексных молекул одного сорта, так и для других, это позволяет существенно упростить анализ кинетики образования эксиплексных молекул и оптимизацию эксилампы. Вполне очевидно, что в таком случае должна иметь место полная корреляция скоростей образования всех сортов эксиплексных молекул за счет гарпунных реакций.

Рассмотрим упрощенно кинетику ключевых процессов, соответствующих данному случаю. В качестве примера будем рассматривать тройную смесь инертного газа ксенона с молекулярным хлором и бромом (Xe–Cl₂–Br₂). Следует отметить, что данный анализ имеет общий характер и остается справедливым и в случае смесей с другим инертным газом или же с другой комбинацией галогеноносителей. В качестве галогеноносителей предполагаются главным образом гомоядерные двухатомные молекулы галогенов. Для рассматриваемого случая кинетические уравнения, описывающие временные зависимости концентрации образующихся эксиплексных молекул XeCl*, XeBr* и возбужденных атомов ксенона Xe*, будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d[\text{XeCl}^*]}{dt} = k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*] - \frac{[\text{XeCl}^*]}{\tau(\text{XeCl}^*)} \\ \frac{d[\text{XeBr}^*]}{dt} = k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*] - \frac{[\text{XeBr}^*]}{\tau(\text{XeBr}^*)} \\ \frac{d[\text{Xe}^*]}{dt} = \Gamma - k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*] - k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*] - F[\text{Xe}^*] \end{cases}, \quad (3)$$

где k_1 и k_2 — соответственно константы скорости образования эксиплексных молекул XeCl* и XeBr* за счет гарпунной реакции (1), $\tau(\text{XeCl}^*)$ и $\tau(\text{XeBr}^*)$ — соответственно эффективные времена жизни эксиплексных молекул XeCl* и XeBr*, Γ — функция, описывающая образование возбужденных атомов ксенона, F — функция, учитывающая все остальные каналы ухода возбужденных атомов ксенона (ионизация, тушение и др.).

В системе (3) каналы образования и ухода возбужденных атомов ксенона заменены функциями Γ и F , которые не конкретизируются (см. также систему (14)). Может создаться впечатление, что в таком описании мы ничего не выигрываем, поскольку эти функции нам неизвестны. На самом деле это не совсем так. Во-первых, в результате этого мы понимаем природу эволюции концентраций интересующих нас реагентов и мощностей (см. (7)–(10), (15)–(18)). Во-вторых, эти функции выпадают из соотношений, на основе которых предлагается проведение оптимизации (см. (11)–(12), (19)). Отметим, что процессы тушения излучающих состояний также имеются в наличии, и их также стоило бы учесть, но мы этого не делаем по причинам, описанным в разд. 4 настоящей работы.

Средние мощности излучения эксиплексных молекул XeCl* и XeBr*, которые в конечном итоге нас и интересуют, определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} P(\text{XeCl}^*) &= \frac{V}{T} \int_0^T \frac{[\text{XeCl}^*]hv(\text{XeCl}^*)}{\tau(\text{XeCl}^*)} dt, \\ P(\text{XeBr}^*) &= \frac{V}{T} \int_0^T \frac{[\text{XeBr}^*]hv(\text{XeBr}^*)}{\tau(\text{XeBr}^*)} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где V — объем активной (излучающей) среды, T — период возбуждающих импульсов, $hv(\text{XeCl}^*)$ и $hv(\text{XeBr}^*)$ — энергии фотонов, излучающихся эксиплексной молекулой XeCl* и XeBr* соответственно.

Если деградация смеси отсутствует, то по достижении устойчивого режима

$$\int_0^T \frac{d[\text{XeCl}^*]}{dt} dt = 0, \quad \int_0^T \frac{d[\text{XeBr}^*]}{dt} dt = 0, \quad (5)$$

и мы можем переписать (4) в виде

$$\begin{aligned} P(\text{XeCl}^*) &= \frac{V}{T} \int_0^T k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeCl}^*)dt, \\ P(\text{XeBr}^*) &= \frac{V}{T} \int_0^T k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeBr}^*)dt, \end{aligned} \quad (6)$$

и в оптимальных условиях работы, когда каналы ухода возбужденных атомов ксенона незначительны, мы можем переписать (6) в виде branch ratio:

$$P(\text{XeCl}^*) = \frac{k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeCl}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F} fV,$$

$$P(\text{XeBr}^*) = \frac{k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]''hv(\text{XeBr}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F} fV, \quad (7)$$

где $f = 1/T$ — частота следования импульсов возбуждения эксилампы, $[\text{Xe}^*]'$ — концентрация возбужденных атомов ксенона, формирующихся за импульс накачки

$$[\text{Xe}^*]' = \int_0^T [\text{Xe}^*](k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F)dt. \quad (8)$$

При выводе (7) аналогично (6) учитывается, что по достижении устойчивого режима

$$\int_0^T \frac{d[\text{Xe}^*]}{dt} dt = 0$$

и

$$\int_0^T \Gamma dt = \int_0^T (k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F)[\text{Xe}^*]dt$$

соответственно

$$\begin{aligned} \int_0^T k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]dt &\cong k_1[\text{Cl}_2] \int_0^T \frac{(k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F)[\text{Xe}^*]dt}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F} \\ &\cong \frac{k_1[\text{Cl}_2]}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F} \int_0^T (k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F)[\text{Xe}^*]dt \\ &= \frac{k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]'}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F}. \end{aligned}$$

Отметим также, что в случае стационарной накачки (например, накачка тлеющим разрядом, электронным пучком) мощности излучения эксиплексных молекул XeCl^* и XeBr^* будут равны

$$\begin{aligned} P(\text{XeCl}^*) &= k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]''hv(\text{XeCl}^*)V, \\ P(\text{XeBr}^*) &= k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]''hv(\text{XeBr}^*)V, \end{aligned} \quad (9)$$

где $[\text{Xe}^*]''$ — стационарная концентрация возбужденных атомов ксенона

$$[\text{Xe}^*]'' = \frac{\Gamma}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + F}, \quad (10)$$

где Γ — скорость образования возбужденных атомов ксенона (см. формулу (3), для случая стационарной накачки $\Gamma = \text{const}$).

Таким образом, соотношение средних мощностей излучения эксиплексных молекул XeCl^* и XeBr^* будет оцениваться простым выражением

$$\frac{P(\text{XeCl}^*)}{P(\text{XeBr}^*)} = \frac{k_1[\text{Cl}_2]hv(\text{XeCl}^*)}{k_2[\text{Br}_2]hv(\text{XeBr}^*)}, \quad (11)$$

а соотношение парциальных давлений галогеноносителей, необходимое для достижения желаемого соотношения средних мощностей излучения эксиплексных молекул XeCl^* и XeBr^*

$$\frac{p(\text{Cl}_2)}{p(\text{Br}_2)} = \frac{k_2}{k_1} \frac{hv(\text{XeBr}^*)}{hv(\text{XeCl}^*)} \frac{P(\text{XeCl}^*)}{P(\text{XeBr}^*)}, \quad (12)$$

где $p(\text{Cl}_2)$ и $p(\text{Br}_2)$ — соответственно парциальные давления молекулярного хлора и брома.

В работе [49] приводятся результаты экспериментального исследования эксилампы барьерного разряда на трехкомпонентной смеси $\text{Kr}-\text{Cl}_2-\text{Br}_2$. Используем данные этой работы для апробации полученных соотношений. Согласно выражению (12), соотношение парциальных давлений галогеноносителей в смеси $\text{Kr}-\text{Cl}_2-\text{Br}_2$, необходимое для получения соразмерных средних мощностей излучения эксиплексных молекул KrCl^* и KrBr^* , составляет

$$\frac{p(\text{Br}_2)}{p(\text{Cl}_2)} = \frac{k(\text{KrCl}^*)}{k(\text{KrBr}^*)} \frac{hv(\text{KrCl}^*)}{hv(\text{KrBr}^*)} \approx 2.5,$$

где константы скоростей гарпунных реакций $k(\text{KrCl}^*) = 7.3 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [97] и $k(\text{KrBr}^*) = 2.7 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [98].

Согласно результатам эксперимента [49], оптимальный состав рабочей смеси, при котором достигается соразмерное излучение эксиплексных молекул KrCl^* и KrBr^* , таков: $\text{Kr}/\text{Cl}_2/\text{Br}_2 = 200/0.3/0.7 \text{ Torr}$, т.е. оптимальное соотношение парциальных давлений молекулярного брома и хлора составляет $p(\text{Br}_2)/p(\text{Cl}_2) = 2.3$.

Как видим, значение соотношений парциальных давлений галогеноносителей, оцененное по выражению (12), находится в хорошем согласии со значением, определенным экспериментально. Следует отметить, что в работе [49] применялся барьерный разряд, и общее давление рабочей смеси было относительно высоким ($\sim 200-300 \text{ Torr}$), что еще раз подтверждает корректность допущения о пренебрежимо малом вкладе реакции ион-ионной рекомбинации. Несущественный вклад этого канала в образовании эксиплексных молекул обусловлен скорее не общим давлением рабочей смеси, а недостаточным образованием реагентов реакции ион-ионной рекомбинации, в особенности отрицательных ионов атомарного галогена.

Следует отметить, что выражение (12) является также пригодным для оценки соотношения парциальных давлений галогеноносителей в случае эксилампы на смеси инертного газа с тремя и более галогеноносителями. В таком случае конечные выражения (11) и (12) не претерпевают никаких изменений. В этом несложно убедиться, если в выражениях, где входит функция F , выделить из нее канал ухода возбужденных атомов ксенона на образование эксиплексных молекул третьего сорта, т.е. представить F , как $k[\text{X}_2] + F$, где $[\text{X}_2]$ — концентрация галогеноносителя третьего сорта, а k — константа скорости образования эксиплексных молекул третьего сорта за счет гарпунной реакции с X_2 . Таким образом, последовательно применяя выражение (12) для других галогеноносителей, можно оценить соотношения парциальных давлений всех галогеноносителей рабочей смеси.

Определение соотношения парциальных давлений галогеноносителей может значительно сократить расход

газов и длительность процесса оптимизации многополосной эксилампы на смеси одного инертного газа и нескольких галогеноносителей. В этом случае оптимизация существенно упрощается и в принципе сводится к случаю оптимизации эксилампы на двухкомпонентной смеси, при которой находятся процентное содержание инертного газа и общее давление рабочей смеси.

При проведении оценок на практике может вызвать затруднения отсутствие достоверных значений констант скоростей гарпунных реакций. Но для проведения оценки достаточно иметь соотношение констант скоростей реакций, которое может быть определено из того же соотношения (12) путем подстановки экспериментально измеренного соотношения мощностей излучения эксиплексных молекул. При этом следует иметь в виду, что измерения лучше проводить при относительно низких давлениях и мощности накачки, чтобы нивелировать процессы тушения и вклад трехчастичной реакции ионной рекомбинации.

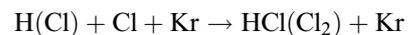
Следует отметить, что вопрос о реальных концентрациях галогеноносителей в смеси еще не полностью прояснен. Дело в том, что через некоторое время после начала работы эксилампы концентрации галогеноносителей могут претерпевать изменения. Это зависит от вида галогеносодержащей молекулы, материала лампы, процедуры ее пассивирования, способа приготовления смеси, наличия в ней примесей, возникающих по тем или иным причинам. В качестве примера отметим известные факты, связанные со смесями, содержащими хлорводород и бромводород, хотя эти галогеносодержащие молекулы и не рассматриваются в настоящей работе. Так, в смесях с молекулами Cl_2 при больших токах в трубках тлеющего разряда эффективность излучения, как отмечается в работах [89,99], существенно превосходит эффективность излучения по сравнению со смесями, содержащими молекулы HCl (отметим, что наилучшие характеристики XeCl , KrCl эксиплексных лазеров получены с молекулой HCl [59–61,67]).

В работе [89] отмечается, что это является следствием того, что скорости гарпунных реакций с молекулами Cl_2 существенно превышают скорости с участием молекул HCl . Но оказывается, что в режиме малых токов тлеющего разряда эффективности излучения смесей с этими двумя донорами молекул хлора примерно одинаковы [99,100]. Это уже нельзя объяснить различием скоростей реакций, так как тогда такое же различие в эффективностях существовало бы и при малых токах тлеющего разряда. С другой стороны, при равенстве скоростей гарпунных реакций можно было бы отнести различия в эффективностях излучения за счет наличия в смесях примесей, но тогда, опять же, эти примеси должны приводить к одинаковым следствиям для больших и малых токов тлеющего разряда.

Возможно, это обусловлено различием констант скоростей прилипания к данным молекулам с образованием отрицательно заряженных ионов, в том числе атомарных

ионов хлора в различных диапазонах энергий электронов разряда, но, скорее всего, дело здесь в частичной диссоциации молекул HCl . При включении разряда начальная концентрация HCl может не соответствовать концентрации HCl реально существующей в плазме тлеющего разряда. В плазме постоянно происходят процессы как распада HCl (за счет гарпунных реакций образования эксиплексных молекул) на атомы H и Cl , так и ассоциации этих атомов в молекулы HCl и Cl_2 . Таким образом, если начальная смесь содержит только молекулы HCl , то в процессе работы эксилампы накапливаются также и молекулы Cl_2 , и эффективности эксиламп могут сравняться. Непонятно только, почему это происходит лишь при малых токах. Частичное подтверждение такой точки зрения содержится в работах [101,102]. При добавлении в активную среду CuVr -лазера молекул водорода во временном поведении генерационных характеристик данного лазера происходят такие же изменения, как и при добавлении молекул бромводорода.

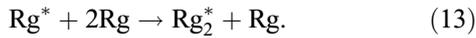
Если диссоциация молекул существенна, то тогда реально существующая концентрация HCl , Cl_2 будет всегда меньше начальной концентрации HCl , Cl_2 в смеси. Скорость ассоциации в результате объемных реакций



мала, особенно для малых давлений смеси. Возможно, восстановление молекул HCl , Cl_2 происходит в основном на стенках разрядной трубки, однако эти данные пока не известны. Тем самым нам неизвестна фактическая степень диссоциации молекул HCl , Cl_2 в разряде и, следовательно, мы не можем считать, что во время работы эксилампы концентрация галогеноносителей такая же, как и в момент напуска газа при подготовке смеси к работе. Если различие поведения мощностей излучения эксиламп от концентраций галогеноносителей зависит от процессов восстановления их концентраций на стенках камеры, то тогда следует ожидать, что реальная концентрация доноров галогена при работе эксилампы будет зависеть не только от сорта галогеноносителя, но и от конструкции эксилампы, в частности, от материала ее стенок и ее геометрии, влияющей на скорость диффузии атомов галогеноносителя к стенкам эксилампы. Таким образом, концентрации галогеноносителей следует контролировать в процессе работы эксилампы. Это более затратно по сравнению с определением концентраций перед началом ее работы, однако в принципе возможно. Например, встроенный реверсивный генератор HBr [95,102] позволял не только подавать HBr в активную среду лазера, но и откачивать его обратно в генератор. Это позволяло поддерживать давление бромида водорода постоянным на необходимом в эксперименте уровне.

2. Излучение эксиплексных и эксимерных молекул

Электрический разряд в смесях, содержащих инертный газ (Rg), может приводить к образованию эксимерных молекул за счет трехчастичной реакции ассоциации [12,15,57,59–61,67,103]:



В связи с этим может представлять интерес вопрос мощности излучения эксимерных молекул, образуемых в эксилампе вместе с эксиплексными молекулами. Как и в предыдущем случае, единственным неизвестным (реагентом) в реакции образования эксимерных молекул (13) является концентрация возбужденных атомов инертного газа (поскольку мы переносим результаты оптимизации двухкомпонентных смесей на многокомпонентные, предполагается, что оптимальные концентрации реагентов двухкомпонентной смеси нам известны), которая зависит от условий накачки эксилампы. Но, поскольку возбужденные атомы инертного газа являются общим реагентом как для образования эксимерных молекул, так и для эксиплексных, это позволяет упростить оценку излучательных характеристик эксиламп.

Рассмотрим упрощенно кинетику ключевых процессов, соответствующих данному случаю. В качестве примера также будем рассматривать тройную смесь инертного газа ксенона с молекулярным хлором и бромом (Xe–Cl₂–Br₂). Кинетические уравнения, описывающие временные зависимости концентрации образующихся эксиплексных молекул XeCl*, XeBr*, эксимерных молекул Xe₂* и возбужденных атомов ксенона Xe* будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d[\text{XeCl}^*]}{dt} = k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*] - \frac{[\text{XeCl}^*]}{\tau(\text{XeCl}^*)} \\ \frac{d[\text{XeBr}^*]}{dt} = k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*] - \frac{[\text{XeBr}^*]}{\tau(\text{XeBr}^*)} \\ \frac{d[\text{Xe}_2^*]}{dt} = k_3[\text{Xe}][\text{Xe}][\text{Xe}^*] - \frac{[\text{Xe}_2^*]}{\tau(\text{Xe}_2^*)} \\ \frac{d[\text{Xe}^*]}{dt} = \Gamma - (k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F)[\text{Xe}^*], \end{cases} \quad (14)$$

где k_1, k_2 и k_3 — соответственно константы скорости образования эксиплексных молекул XeCl*, XeBr* за счет гарпунной реакции (1) и эксимерных молекул Xe₂* за счет реакции ассоциации (13), $\tau(\text{XeCl}^*)$, $\tau(\text{XeBr}^*)$ и $\tau(\text{Xe}_2^*)$ — соответственно эффективные времена жизни эксиплексных молекул XeCl*, XeBr* и эксимерных молекул Xe₂*, Γ — функция, описывающая образование возбужденных атомов ксенона, F — функция, учитывающая все остальные каналы ухода возбужденных атомов ксенона (ионизация, тушение и др.).

Аналогичное рассмотрение (см. подробнее разд. 2) уравнений (14) приводит к средним мощностям

$$\begin{aligned} P(\text{XeCl}^*) &= \frac{k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeCl}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} fV, \\ P(\text{XeBr}^*) &= \frac{k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeBr}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} fV, \\ P(\text{Xe}_2^*) &= \frac{k_3[\text{Xe}]^2[\text{Xe}^*]hv(\text{Xe}_2^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} fV, \end{aligned} \quad (15)$$

где f — частота следования импульсов возбуждения эксилампы, $[\text{Xe}^*]$ — концентрация возбужденных атомов ксенона, нарабатываемая за импульс накачки

$$[\text{Xe}^*]' = \int_0^T [\text{Xe}^*](k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F) dt. \quad (16)$$

Отметим также, что в случае стационарной накачки (например, накачка тлеющим разрядом, электронным пучком) выражения, описывающие мощности излучения эксиплексных молекул XeCl*, XeBr* и эксимерных молекул Xe₂*, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} P(\text{XeCl}^*) &= k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]''hv(\text{XeCl}^*)V, \\ P(\text{XeBr}^*) &= k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]''hv(\text{XeBr}^*)V, \\ P(\text{Xe}_2^*) &= k_3[\text{Xe}]^2[\text{Xe}^*]''hv(\text{Xe}_2^*)V, \end{aligned} \quad (17)$$

где $[\text{Xe}^*]''$ — стационарная концентрация возбужденных атомов ксенона

$$[\text{Xe}^*]'' = \frac{\Gamma}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F}, \quad (18)$$

где Γ — скорость образования возбужденных атомов ксенона ($\Gamma = \text{const}$ для случая стационарной накачки).

Таким образом, соотношение средних мощностей излучения эксимерных молекул Xe₂* и эксиплексных молекул XeCl* можно оценить простым выражением

$$\frac{P(\text{Xe}_2^*)}{P(\text{XeCl}^*)} = \frac{k_3[\text{Xe}]^2hv(\text{Xe}_2^*)}{k_1[\text{Cl}_2]hv(\text{XeCl}^*)}. \quad (19)$$

Поскольку эксимерные молекулы излучают в ВУФ спектральной области, их применение существенно ограничено сильным поглощением ВУФ-излучения в атмосфере. На практике преимущественно применяется излучение эксиплексных молекул, а сопутствующее в эксилампе излучение эксимерных молекул во внимание не принимается. Если эксилампа оптимизируется по суммарной мощности эксимерных и эксиплексных молекул, а эксимерное излучение при этом не используется, то это может приводить, из-за реакции (13), к существенному снижению эффективности эксилампы на длинах волн эксиплексного излучения. В этом случае для повышения эффективности эксилампы лучше ориентироваться на условия, когда излучение эксимерных молекул подавлено по сравнению с излучением эксиплексных молекул.

Соотношение (19) может быть полезным в таком случае и при оптимизации однополосных эксиламп на бинарных смесях. Задавшись мощностью излучения эксимерных молекул существенно ниже мощности излучения эксиплексных, можно оценить относительное содержание инертного газа.

3. Методика оптимизации газовой смеси многополосной эксилампы

При оптимизации двухкомпонентной рабочей смеси на практике часто используется следующий подход. Эксилампа наполняется газами с пробным соотношением компонент смеси с небольшим избытком по общему давлению. Далее осуществляется постепенное снижение общего давления смеси посредством откачки эксилампы с одновременной регистрацией мощности излучения эксиплексных молекул. После прогонки одного соотношения компонент смеси прогоняется другое. Таким образом, находятся оптимальное общее давление и соотношение компонент рабочей смеси, при которых мощность излучения или КПД максимальны. Однако в случае многокомпонентной газовой смеси данная процедура усложняется ввиду большого количества переменных.

Если интерес представляет только достижение нужного соотношения мощностей излучения эксиплексных молекул, а излучение эксимерных несущественно, то процесс оптимизации такой эксилампы относительно прост. Поскольку соотношение парциальных давлений галогеносителей можно оценить по выражению (12), остается экспериментально определить только относительное содержание инертного газа и общее давление смеси. А эта задача аналогична оптимизации эксилампы на двухкомпонентной смеси, несмотря на возможное использование большого числа различных галогеносителей. Как можно видеть в выражении (12), соотношение мощностей излучения эксиплексных молекул при постоянном соотношении парциальных давлений галогеносителей не зависит от общего давления смеси (в пределах, где вклад реакции ион-ионной рекомбинации и процессов тушения незначителен). Поэтому вышеупомянутая методика оптимизации эксилампы посредством откачки может успешно применяться совместно с проведением оценок по соотношению (12).

Рассмотрим случай, когда необходимо обеспечить желаемое соотношение мощностей излучения не только эксиплексных молекул, но и эксимерных. Поскольку соотношение компонент газовой смеси можно оценить по выражениям (12) и (19), необходимо экспериментально подобрать только общее давление смеси. Однако в этом случае методика с применением откачки усложняется, поскольку соотношение мощностей излучения эксимерных молекул к эксиплексным, согласно выражению (19), будет линейно убывать по мере откачки эксилампы. Исходя из выражения (19), не сложно прийти к заключению, что если общее давление смеси при откачке

уменьшится в n раз, то для того, чтобы соотношение мощностей излучения эксимерных и эксиплексных молекул не изменилось, необходимо увеличить содержание в рабочей смеси инертного газа в \sqrt{n} раз. Следовательно, общее давление смеси при откачке на величину $\Delta p_{\text{mixture}}$ нужно увеличить за счет напуска инертного газа до значения p'_{mixture} , равного

$$p'_{\text{mixture}} = \frac{p_{\text{mixture}} - \Delta p_{\text{mixture}}}{p_{\text{mixture}}} \times \left(p(\text{Cl}_2) + p(\text{Br}_2) + p(\text{Xe}) \sqrt{\frac{p_{\text{mixture}}}{p_{\text{mixture}} - \Delta p_{\text{mixture}}}} \right), \quad (20)$$

где p_{mixture} — давление смеси до откачки, $\Delta p_{\text{mixture}}$ — изменение давления смеси посредством откачки, p'_{mixture} — давление смеси после добавки инертного газа.

Проведение перерасчета парциальных давлений компонент смеси с последующим вычислением количества необходимой добавки инертного газа после каждого шага откачки требует применения вычислительной техники, что может доставлять неудобства в процессе оптимизации эксилампы. Но на практике этих перерасчетов в принципе можно избежать. Опираясь на показания измерительной аппаратуры после каждого шага откачки смеси, необходимо восстановить прежнее соотношение мощностей излучения эксиплексных и эксимерных молекул за счет напуска инертного газа.

4. Влияние процессов тушения

Если принять во внимание и процессы тушения эксимерных и эксиплексных молекул, то мощности их излучения будут определяться следующими выражениями:

$$P(\text{XeCl}^*) = \frac{k_1[\text{Cl}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeCl}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} \frac{fV}{Q(\text{XeCl}^*)},$$

$$P(\text{XeBr}^*) = \frac{k_2[\text{Br}_2][\text{Xe}^*]hv(\text{XeBr}^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} \frac{fV}{Q(\text{XeBr}^*)},$$

$$P(\text{Xe}_2^*) = \frac{k_3[\text{Xe}]^2[\text{Xe}^*]hv(\text{Xe}_2^*)}{k_1[\text{Cl}_2] + k_2[\text{Br}_2] + k_3[\text{Xe}]^2 + F} \frac{fV}{Q(\text{Xe}_2^*)}, \quad (21)$$

где

$$Q(Y)^* = \tau(Y^*) \left(k'[\text{Cl}_2] + k''[\text{Br}_2] + k'''[\text{Xe}] + k''''n_e + \frac{1}{\tau(Y^*)} \right)$$

— функция, учитывающая процессы тушения соответствующих эксиплексных/эксимерных молекул (Y^* — эксиплексная/эксимерная молекула; k', k'', k''', k'''' — константа скорости тушения эксиплексной/эксимерной молекулы Y^* соответственно молекулами хлора, молекулами брома, атомами ксенона и электронами).

Если обратное время жизни молекул $\frac{1}{\tau(Y^*)}$ намного больше скорости ее тушения

$$(k'[Cl_2] + k''[Br_2] + k'''[Xe] + k''''n_e) \ll \frac{1}{\tau(Y^*)}, \quad (22)$$

то функция $Q(Y^*) \approx 1$, а значит, процессами тушения можно пренебречь. Однако при значительных концентрациях тушащих частиц процессы тушения становятся существенны и оказывают влияние на излучательные характеристики эксилампы, а соотношения (12) и (19) деформируются, но можно ожидать, что процессы тушения оказывают существенное влияние за пределами оптимальных условий работы эксилампы. Основания полагать именно так основываются на том, что при оптимальных условиях работы тушение эксиплексных молекул должно быть незначительным, поскольку оно ведет к снижению КПД эксилампы, а значит, условия работы эксилампы, при которых тушение значительно, не будут оптимальны. Тем не менее процессы тушения могут проявляться и мешать в процессе оптимизации эксилампы, в особенности когда условия далеки от оптимальных. Неравенство (22) может быть использовано как дополнительное условие для оценки абсолютных концентраций компонент газовой смеси эксилампы с целью достижения ее максимального КПД.

Заключение

В работе рассматривается вопрос оптимизации газовых смесей многополосных эксиламп на газовых смесях одного инертного газа с несколькими галогенонесителями.

Приводятся простые выражения, позволяющие оценить соотношение парциальных давлений компонент газовой смеси эксилампы, что позволяет ускорить оптимизацию многополосной эксилампы с желаемым соотношением мощностей излучения рабочих молекул.

Показано, что оптимизация многополосной эксилампы может быть сведена к задаче оптимизации эксилампы на двухкомпонентной смеси, при которой экспериментально устанавливаются процентное содержание инертного газа и общее давление рабочей смеси.

Для ситуаций, когда необходимо использовать как эксиплексное, так и эксимерное излучения, получено выражение, регулирующее относительных вклад мощностей в зависимости от концентрации инертного газа.

Если использование эксимерного излучения не предполагается, то максимальный КПД эксилампы должен достигаться при минимизации ухода возбужденных атомов инертного газа на образование эксимерных молекул. Исходя из этого, можно оценить соотношение парциальных давлений инертного газа и галогенонесителя по выражению (19), задавшись при этом мощностью излучения эксимерных молекул ниже мощности эксиплексных.

Степень подавленности мощности излучения эксимерных молекул подбирается из требования необходимого уровня мощности эксилампы.

Максимальный КПД эксилампы должен наблюдаться, когда интенсивность процессов тушения эксиплексных молекул незначительна. Это обстоятельство регулируется соотношением (22), которое может быть использовано как дополнительное условие для оценки концентраций компонент газовой смеси эксилампы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.М. Бойченко. *Ламповые источники излучения: Теоретическое описание* (LAP LAMBERT Academic Publishing, M., 2018)
- [2] R. Nagy. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **25** (3), 274 (1964). DOI: 10.1080/00028896409342587
- [3] М.Н. Якименко. *УФН*, **114** (1), 55 (1974). DOI: 10.3367/UFNr.0114.197409c.0055 [M.N. Yakimenko. *Sov. Phys. Usp.*, **17** (5), 651 (1975). DOI: 10.1070/PU1975v017n05ABEN004363]
- [4] М.А. Цикулин, Е.Г. Попов. *Излучательные свойства ударных волн в газах* (Наука, М., 1977)
- [5] И.С. Маршак. *Импульсные источники света* (Энергия, М., 1978)
- [6] Г.А. Волкова, Н.Н. Кириллова, Е.Н. Павловская, И.В. Подмошенский, А.В. Яковлева. *Бюллетень изобретений*, **41**, 179 (1982).
- [7] Г.Н. Рохлин. *Разрядные источники света* (Энергоатомиздат, М., 1991)
- [8] А.А. Рухадзе, А.Ф. Александров. *Физика сильноточных электроразрядных источников света* (URSS, M., 2012)
- [9] А.М. Бойченко, В.Ф. Тарасенко, Е.А. Фомин, С.И. Яковленко. *Квант. электрон.*, **20** (1), 7 (1993). [A.M. Boichenko, V.F. Tarasenko, E.A. Fomin, S.I. Yakovlenko. *Quant. Electron.*, **23** (1), 3 (1993). DOI: 10.1070/QE1993v023n01ABEN002929]
- [10] А.А. Алехин, В.А. Баринин, Ю.В. Герасько, О.Ф. Костенко, Ф.Н. Любченко, А.В. Тюкавкин, В.И. Шалашков. *Непрерывные плазмохимические источники света* (БИОР, М., 1997)
- [11] А.М. Boichenko, A.V. Karelin, S.I. Yakovlenko. *Las. Phys.*, **9** (6), 1190 (1999).
- [12] А.М. Boichenko, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Las. Phys.*, **9** (5), 1004 (1999).
- [13] B.L. Diffey. *Methods*, **28** (1), 4 (2002). DOI: 10.1016/S1046-2023(02)00204-9
- [14] М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев. *УФН*, **173** (2), 201 (2003). DOI: 10.3367/UFNr.0173.200302d.0201 [M.I. Lomaev, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, D.V. Shitts, M.V. Erofeev. *Phys.-Usp.*, **46** (2), 193 (2003). DOI: 10.1070/PU2003v046n02ABEN001308]

- [15] А.М. Бойченко, А.В. Феденев. *Излучательные континуумы инертных газов*. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных*, под ред. В.Е. Фортова (Физматлит, М., 2005), т. XI-4, с. 546.
- [16] А.М. Boichenko. *Lasers and Lamps With Excitation by Background-Electron Multiplication Wave*. In: *Laser Beams: Theory, Properties and Applications*, ed. by M. Thys, E. Desmet (Nova Science Publishers, NY., 2011), p. 283.
- [17] А.М. Бойченко, М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко. *Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: Физика, техника и применения* (STT Publishing, Томск, 2011)
- [18] А.М. Бойченко, С.И. Яковленко. *Моделирование ламповых источников излучения*. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных*, под ред. В.Е. Фортова (Физматлит, М., 2005), т. XI-4, с. 569.
- [19] А.А. Генерал, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпенник, М.С. Кленовский. *Опт. и спектр.*, **114** (1), 28 (2013). [A.A. General, V.A. Kel'man, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik, M.S. Klenovskii. *Opt. Spectr.*, **114** (1), 25 (2013). DOI: 10.1134/S0030400X13010104]
- [20] Y. Muramoto, M. Kimura, S. Nouda. *Semicond. Sci. Technol.*, **29** (8), 084004 (2014). DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/084004
- [21] Д.Б. Абраменко, П.С. Анциферов, Д.И. Астахов, А.Ю. Виноходов, И.Ю. Вичев, Р.Р. Гаязов, А.С. Грушин, Л.А. Дорохин, В.В. Иванов, Д.А. Ким, К.Н. Кошелев, П.В. Крайнов, М.С. Кривокорытов, В.М. Кривцун, Б.В. Лакатош, А.А. Лаш, В.В. Медведев, А.Н. Рябцев, Ю.В. Сидельников, Е.П. Снегирёв, А.Д. Соломянная, М.В. Спиридонов, И.П. Цыгвинцев, О.Ф. Якушев, А.А. Якушкин. *УФН*, **189** (3), 323 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2018.06.038447 [D.B. Abramenko, P.S. Antsiferov, D.I. Astakhov, A.Yu. Vinokhodov, I.Yu. Vichev, R.R. Gayazov, A.S. Grushin, L.A. Dorokhin, V.V. Ivanov, D.A. Kim, K.N. Koshelev, P.V. Krainov, M.S. Krivokorytov, V.M. Krivtsov, B.V. Lakatos, A.A. Lash, V.V. Medvedev, A.N. Ryabtsev, Yu.V. Sidel'nikov, E.P. Snegirev, A.D. Solomyannaya, M.V. Spiridonov, I.P. Tsygvintsev, O.F. Yakushev, A.A. Yakushkin. *Phys. Usp.*, **62** (3), 304 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2018.06.038447]
- [22] U. Kogelschatz, H. Esrom. *Laser Optoelektron.*, **22** (4), 55 (1990).
- [23] M.I. Lomaev, A.N. Panchenko, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, M.G. Adamson, B.R. Myers, F.T. Wang. *Laser Particle Beams*, **15** (2), 339 (1997). DOI: 10.1017/S0263034600010636
- [24] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli. *J. Phys. IV France*, **7** (C4), 47 (1997). DOI: 10.1051/jp4:1997405
- [25] I.W. Boyd, J.Y. Zhang. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B*, **121** (1–4), 349 (1997). DOI: 10.1016/S0168-583X(96)00538-1
- [26] T. Bintsis, E. Litopoulou-Tzanetaki, R.K. Robinson. *J. Sci. Food Agric.*, **80** (6), 637 (2000). DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(20000501)80:6%3C637::AID-JSFA603%3E3.0.CO;2-1
- [27] R.P. Mildren, R.J. Carman. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34** (1), L1 (2001). DOI: 10.1088/0022-3727/34/1/101
- [28] U. Kogelschatz. *Proc. SPIE*, **5483**, 272 (2004). DOI: 10.1117/12.563006
- [29] U. Kogelschatz. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, **23** (1), 1 (2003). DOI: 10.1023/A:1022470901385
- [30] U. Kogelschatz. *Plasma Phys. Control. Fusion.*, **46** (12B), B63 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/12B/006
- [31] K.H. Becker, U. Kogelschatz, K.H. Schoenbach, R.J. Barker. *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure* (CRC Press, Boca Raton, 2004)
- [32] А.М. Бойченко, С.И. Яковленко. *Квант. электрон.*, **36** (12), 1176 (2006). [A.M. Boichenko, S.I. Yakovlenko. *Quant. Electron.*, **36** (12), 1176 (2006). DOI: 10.1070/QE2006v036n12ABEH012790]
- [33] A. Endruweit, M.S. Johnson, A.C. Long. *Polymer Compos.*, **27** (2), 119 (2006). DOI: 10.1002/pc.20166
- [34] В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко, А.М. Бойченко, И.Д. Костыря, М.И. Ломаев, А.Н. Ткачев. *О накачке лазеров и ламп разрядами на основе волны размножения электронов фона*. В сб.: *Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотных газах*, под ред. С.И. Яковленко (Наука, М., 2007), т. 63, с. 148.
- [35] V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko, A.M. Boichenko, I.D. Kostyrya, M.I. Lomaev, A.N. Tkachev. *Phys. Wave Phen.*, **16** (3), 180 (2008). DOI: 10.3103/S1541308X08030047
- [36] I.W. Boyd, I.I. Liaw. *Proc. SPIE*, **6261**, 626104 (2006). DOI: 10.1117/12.686233
- [37] M. Keyser, I.A. Müller, F.P. Cillier, W. Nel, P.A. Gouws. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **9** (3), 348 (2008). DOI: 10.1016/j.ifset.2007.09.002
- [38] A. Gupta, P. Avci, T. Dai, Y.Y. Huang, M.R. Hamblin. *Adv. Wound Care*, **2** (8), 422 (2013). DOI: 10.1089/wound.2012.0366
- [39] L. Manzocco, M.C. Nicoli. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **55** (4), 469 (2015). DOI: 10.1080/10408398.2012.658460
- [40] M.M. Delorme, J.T. Guimarães, N.M. Coutinho, C.F. Balthazar, R.S. Rocha, R. Silva, L.P. Margalho, T.C. Pimentel, M.C. Silva, M.Q. Freitas, D. Granato, A.S. Sant'Ana, M.C.K.H. Duarte, A.G. Cruz. *Trends Food Sci. Technol.*, **102**, 146 (2020). DOI: j.tifs.2020.06.001
- [41] V.A. Kelman, Yu.O. Shpenik, Yu.V. Zhmenyak. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (25), 255202 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/25/255202
- [42] I.W. Boyd, J.Y. Zhang. *Solid-State Electron.*, **45** (8), 1413 (2001). DOI: 10.1016/S0038-1101(00)00259-8
- [43] E.A. Sosnin, T. Oppenländer, V.F. Tarasenko. *J. Photochem. Photobiol. C*, **7** (4), 145 (2006). DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2006.12.002
- [44] Э.А. Соснин, В.С. Скакун, В.А. Панарин, С.М. Авдеев, Д.А. Сорокин. *Оптич. журн.*, **88** (10), 50 (2021). DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-10-50-58
- [45] Э.А. Соснин, О.С. Жданова. *Квант. электрон.*, **50** (10), 984 (2020). [E.A. Sosnin, O.S. Zhdanova. *Quant. Electron.*, **50** (10), 984 (2020). DOI: 10.1070/QEL17374]
- [46] А.К. Шуайбов. *ЖТФ*, **68** (12), 64 (1998). [A.K. Shuaibov. *Tech. Phys.*, **43** (12), 1459 (1998). DOI:10.1134/1.1259225]
- [47] А.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон, А.И. Дашченко, И.В. Шевера. *ЖТФ*, **71** (2), 77 (2001). [A.K. Shuaibov, L.L. Shimon, A.I. Dashchenko, I.V. Shevera. *Tech. Phys.*, **46** (2), 207 (2001). DOI: 10.1134/1.1349278]

- [48] N.N. Guivan, A. Janča, A. Brablec, P. Stáhel, P. Slavíček, L.L. Shimon. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38** (17), 3188 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/17/S21
- [49] S.M. Avdeev, A.M. Boichenko, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Laser Phys.*, **17** (9), 1119 (2007). DOI: 10.1134/S1054660X07090022
- [50] М.С. Кленовский, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпенник. *Опт. спектр.*, **114** (2), 216 (2013). [M.S. Klenovskii, V.A. Kel'man, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik. *Opt. Spectrosc.*, **114** (2), 197 (2013). DOI: 10.1134/S0030400X13010141]
- [51] B. Gellert, U. Kogelschatz. *Appl. Phys. B*, **52** (1), 14 (1991). DOI: 10.1007/BF00405680
- [52] P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright. *Practical Optimization* (Academic Press, London, 1997)
- [53] A. Ravindran, G.V. Reklaitis, K.M. Ragsdell. *Engineering Optimization: Methods and Applications* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2006), 2nd ed.
- [54] M.S. Bazaraa, H.D. Sherali, C.M. Shetty. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2006), 3rd ed.
- [55] G.B. Arfken, H.J. Weber, F.E. Harris. *Mathematical Methods for Physicists* (Academic Press, Waltham, 2013), 7th ed.
- [56] M.J.D. Powell. *Comp. J.*, **7** (2), 155 (1964). DOI: 10.1093/comjnl/7.2.155
- [57] Ч. Роудз, Ч. Брау, А. Галлагер, П. Хофф, М. Кросс, М. Мак-Каскер, Ф. Ми. *Экцимерные лазеры* (Мир, М., 1981) [Пер. с англ.: Ch.K. Rhodes, C.A. Brau, A. Gallagher, P.W. Hoff, M. Krauss, M.V. McCusker, F.H. Mies. *Excimer Lasers* (Springer, Berlin, 1979)]
- [58] В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко. *Квант. электрон.*, **24** (12), 1145 (1997). [V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Quant. Electron.*, **27** (12), 1111 (1997). DOI: 10.1070/QE1997v027n12ABEH001103]
- [59] A.M. Boichenko, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Laser Phys.*, **10** (6), 1159 (2000).
- [60] А.М. Бойченко, В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко. *Лазеры на экциплексных и эксимерных молекулах*. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных*, под ред. В.Е. Фортова (Физматлит, М., 2005), т. XI-4, с. 471.
- [61] S.I. Yakovlenko. *Excimer and Exciplex Lasers*. In: *Gas Lasers*, ed. by M. Endo, R.F. Walter (CRC Press, Boca Raton, 2007), p. 369.
- [62] И. Мак-Даниэль, У. Ниген. *Газовые лазеры* (Мир, М., 1986) [Пер. с англ.: E.W. McDaniel, W.L. Nighan. *Gas Lasers* (Academic Press, NY, 1982)]
- [63] Л.И. Гудзенко, С.И. Яковленко. *Плазменные лазеры* (Атомиздат, М., 1978)
- [64] А.Г. Молчанов. *Труды ФИАН*, **171**, 54 (1986).
- [65] С.И. Яковленко. *Плазменные лазеры видимого и ближнего УФ диапазонов* (Наука, М., 1989)
- [66] С.И. Яковленко. Газовые и плазменные лазеры. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том*, под ред. В.Е. Фортова (Наука, М., 2000), т. IV, с. 262.
- [67] A.M. Boichenko, A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, A.N. Tkachev, N.A. Panchenko. *Plasma and Gas Lasers* (STT Publishing, Tomsk, 2017)
- [68] J.Y. Zhang, I.W. Boyd. *J. Appl. Phys.*, **80** (2), 633 (1996). DOI: 10.1063/1.362871
- [69] А.А. Алехин, В.А. Баринов, Ю.В. Герасько, О.Ф. Костенко, Ф.Н. Любченко, А.В. Тюкавкин. *ЖТФ*, **63** (2), 43 (1993).
- [70] А.А. Алехин, В.А. Баринов, Ю.В. Герасько, О.Ф. Костенко, Ф.Н. Любченко, А.В. Тюкавкин. *ЖТФ*, **65** (5), 9 (1995).
- [71] О.Ф. Костенко. Исследовано в России, **4**, 715 (2001).
- [72] А.М. Бойченко. *Квант. электрон.*, **29** (2), 163 (1999). [A.M. Boichenko. *Quant. Electron.*, **29** (11), 1001 (1999). DOI: 10.1070/QE1999v029n11ABEH001623]
- [73] Р.Б. Рийвес, Е.А. Светличный, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман, Ю.О. Шпенник. *ЖТФ*, **74** (10), 90 (2004). [R.B. Riives, E.A. Svetlichnyi, Yu.V. Zhmenyak, V.A. Kel'man, Yu.O. Shpenik. *Tech. Phys.*, **49** (10), 1335 (2004). DOI: 10.1134/1.1809707]
- [74] Р.Б. Рийвес, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман, Ю.О. Шпенник. *ЖТФ*, **76** (10), 102 (2006). [R.B. Riives, Yu.V. Zhmenyak, V.A. Kel'man, Yu.O. Shpenik. *Tech. Phys.*, **51** (10), 1355 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206100161]
- [75] М.С. Кленовский, Р.Б. Рийвес, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпенник. *ЖТФ*, **79** (7), 81 (2009). [M.S. Klenovskii, R.B. Riives, V.A. Kel'man, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik. *Tech. Phys.*, **54** (7), 1007 (2009). DOI: 10.1134/S1063784209070135]
- [76] М.С. Кленовский, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпенник. *ЖТФ*, **80** (5), 117 (2010). [M.S. Klenovskii, V.A. Kel'man, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik. *Tech. Phys.*, **55** (5), 709 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210050178]
- [77] А.М. Бойченко, М.С. Кленовский. *ЖТФ*, **83** (5), 125 (2013). [A.M. Boichenko, M.S. Klenovskii. *Tech. Phys.*, **58** (5), 744 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213050058]
- [78] А.М. Бойченко, М.С. Кленовский. *Квант. электрон.*, **45** (12), 1105 (2015). [A.M. Boichenko, M.S. Klenovskii. *Quant. Electron.*, **45** (12), 1105 (2015). DOI: 10.1070/QE2015v045n12ABEH015859]
- [79] D.J. Ehrlich, Jr. R.M. Osgood. *J. Chem. Phys.*, **73** (7), 3038 (1980). DOI: 10.1063/1.440561
- [80] J.P.T. Wilkinson, M. MacDonald, R.J. Donovan. *Chem. Phys. Lett.*, **101** (3), 284 (1983). DOI: 10.1016/0009-2614(83)87013-4
- [81] A.M. Boichenko, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Laser Phys.*, **10** (2), 540 (2000).
- [82] M.R. Flannery, T.P. Yang. *Appl. Phys. Lett.*, **32** (5), 327 (1978). DOI: 10.1063/1.90038
- [83] M.R. Flannery, T.P. Yang. *Appl. Phys. Lett.*, **32** (6), 356 (1978). DOI: 10.1063/1.90057
- [84] И.С. Лакоба, Е.Д. Сучкова, Ю.И. Сыцько. *Препринт ФИАН*, **8**, 27 (1981).
- [85] И.С. Лакоба, Ю.И. Сыцько, Е.Л. Якубцева. *Кр. сообщ. по физике*, **8**, 26 (1982).
- [86] Б.М. Смирнов. *УФН*, **139** (1), 53 (1983). [B.M. Smirnov. *Sov. Phys. Usp.*, **26** (1), 31 (1983). DOI: 10.1070/PU1983v026n01ABEH004304]
- [87] X. Zhuang, Q. Han, H. Zhang, X. Feng, M. Roth, O. Rosier, Sh. Zhu, Sh. Zhang. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43** (20), 205202 (2010). DOI: 10.1088/0022-3727/43/20/205202
- [88] А.Н. Панченко, А.С. Полякевич, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко. *Изв. вузов. Физика*, **42** (6), 50 (1999).
- [89] A. Schwabedissen, W. Böttcher. *Contrib. Plasma Phys.*, **35** (6), 517 (1995). DOI: 10.1002/ctpp.2150350606
- [90] А.Н. Панченко, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, М.И. Ломаев. *Письма в ЖТФ*, **21** (20), 77 (1995).

- [91] М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко. *ЖТФ*, **68** (2), 64 (1998). [M.I. Lomaev, A.N. Panchenko, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. *Tech. Phys.*, **43** (2), 192 (1998). DOI: 10.1134/1.1258966]
- [92] G.A. Hart, S.K. Searles. *J. Appl. Phys.*, **47**, 2033 (1976). DOI: 10.1063/1.322931
- [93] А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко. *Квант. электрон.*, **38** (1), 88 (2008). [A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko. *Quant. Electron.*, **38** (1), 88 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n01ABEH013587]
- [94] A.V. Pira, R. Bussiahn. *Contrib. Plasma Phys.*, **51** (9), 850 (2011). DOI: 10.1002/ctpp.201100011
- [95] С.Н. Торгаев, Г.С. Евтушенко, А.М. Бойченко. *Кинетика активной среды лазера на парах бромида меди (LAP LAMBERT Academic Publishing, M., 2014)*
- [96] V.M. Batenin, V.V. Buchanov, A.M. Boichenko, M.A. Kazaryan, I.I. Klimovskii, E.I. Molodykh. *High-brightness Metal Vapour Lasers: Physical Fundamentals and Mathematical Models. CISP: CRC Press Taylor & Francis Group* (Boca Raton, London, NY., 2016), v. 1.
- [97] A.M. Boichenko, S.I. Yakovlenko. *Laser Phys.*, **14** (1), 1 (2004).
- [98] M.T. Jones, T.D. Dreiling, D.W. Setser, R.N. McDonald. *J. Phys. Chem.*, **89**, 4501 (1985). DOI: 10.1021/j100267a020
- [99] М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко. *Опт. атм. океана*, **9** (2), 199 (1996).
- [100] A.M. Boichenko, A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko. *Laser Phys.*, **5** (6), 1112 (1995).
- [101] A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, S.N. Torgaev. *Laser Phys.*, **18** (12), 1522 (2008). DOI: 10.1134/S1054660X08120219
- [102] A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, V.O. Nekhoroshev, D.V. Shiyanov, S.N. Torgaev. *Phys. Wave Phenom.*, **23** (1), 1 (2015). DOI: 10.3103/S1541308X1501001X
- [103] B. Eliasson, U. Kogelschatz. *Appl. Phys. B*, **46**, 299 (1988). DOI: 10.1007/BF00686452